

# Development of the Wide-Field Camera System Using Kinetic Inductance Detectors for the Antarctic Terahertz Telescope

著者	新田 冬夢
内容記述	この博士論文は内容の要約のみ公表しています
発行年	2014
その他のタイトル	南極テラヘルツ望遠鏡のための力学インダクタンス 検出器を用いた広視野カメラシステムの開発
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2013
報告番号	12102甲第6798号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/00123254">http://hdl.handle.net/2241/00123254</a>

## 数理物質科学研究科 博士論文の要約

専攻名 物理学専攻  
学籍番号 201130072  
学生氏名 新田 冬夢  
学位名 博士（理学）  
指導教員 中井 直正

博士論文題目 Development of the Wide-Field Camera System Using Kinetic Inductance  
Detectors for the Antarctic Terahertz Telescope  
(南極テラヘルツ望遠鏡のための力学インダクタンス検出器を用いた  
広視野カメラシステムの開発)

南極ドームふじ基地に建設を計画している南極 10 m テラヘルツ望遠鏡に搭載するための 220 GHz 帯 608 画素ミリ波広視野カメラシステムの開発、およびその技術をもとに高周波化と画素数を拡張した約 20000 画素を有する 850 GHz 帯テラヘルツ波カメラの設計を行った。

標高 3800 m の極寒の高地に位置し水蒸気量が非常に少ない南極ドームふじ基地において、ミリ波帯からテラヘルツ波帯にかけて遠方銀河のサーベイ観測を行い、銀河の形成進化や宇宙の大規模構造を明らかにすることを目指している。従来のミリ波／テラヘルツ波カメラの画素数は数画素程度であったが、広視野望遠鏡と 1000 画素規模の多画素カメラを組み合わせることで、従来に比べはるかに高効率な遠方銀河の広視野サーベイ観測を実現する。

カメラの検出器として、1) 多画素化の際に鍵を握る多重化読み出しが容易、2) 超伝導膜一層から構成されるため高い歩留まりが期待できる、という特徴を持つ力学インダクタンス検出器 (MKID) を採用した。MKID は超伝導伝送線路を用いた LC 共振回路によって構成されており、準粒子生成によるインダクタンス変化が共振の強度および位相の変化として読み出される。超伝導膜には 90 GHz 以上の光子を検出可能なアルミニウムを使用しており、本研究の観測バンドである 220–850 GHz 帯すべてをカバーすることが出来る。

多画素カメラのための要素技術として、1) カメラの集積化の設計、2) 切削加工による一体型シリコンレンズアレイの開発、3) シリコンレンズの反射防止コーティングの開発を行った。多画素カメラでは焦点面の有効面積の制限から高い集積度が要求されるため、集積度に優れた平面アンテナと誘電体レンズアレイを用いて光学系を設計した。平面アンテナにはビームパターン(アンテナの感度分布)が対称で MKID との結合が容易なダブルスロットアンテナを、レンズ形状は更に円対称かつサイドローブが低いビームパターンが得られる延長半球レンズをそれぞれ用いる。レンズアレイの誘電体には、屈折率と誘電正接の測定から、低温で高い屈折率 ( $n \sim 3.38$ ) と低い誘電正接 ( $\tan\delta \sim 10^{-4}$ ) を持つ高純度多結晶シリコンが適していることを明らかにした。延長半球レンズは半球レンズと平板から構成されるが、集積度を上げるためにレンズ口径を小さくすると平板の厚みが薄くなり ( $< 300 \mu\text{m}$ ) 製作が困難になる。そこで、レンズ内の電界分布がレンズ上部に集中することを利用し、レンズ直径が観測波長の 1.2, 2, 3 倍という小口径レンズについてビームパターンのシミュレーションを行った。結果、それぞれのレンズ

について、1) 高い集積度を得るために最密構造を持つ、2) 製作可能な平板の厚み(> 300  $\mu\text{m}$ ) を持つ場合でも円対称かつサイドローブ-15 dB 以下のビームパターンを得る設計解を示した。従来では、単一のシリコン半球レンズをシリコン平板に接着剤により結合させることで、シリコンレンズアレイを製作していた。しかし、アライメントずれや接着剤による影響が問題になる。これらの問題点を解決するために、高速スピンドルを用いた小径エンドミルによりシリコン板を切削加工することで、一体型のシリコンレンズアレイを製作した。加工精度はミリ波帯からテラヘルツ帯での使用に影響がない形状誤差 15  $\mu\text{m}$  以下、表面粗さ 1  $\mu\text{m}$  (rms)を達成した。

シリコンレンズの表面では約 30%の反射損失が生じるため、屈折率 1.84 の反射防止コーティングが必須である。反射防止コーティングの開発には屈折率と膜厚の制御が鍵を握る。そこで、低温での接着性が良い屈折率 1.68 と 2.2 の 2 種類のエポキシ樹脂を混ぜ合わせることで屈折率の制御を試みた。結果、エポキシ樹脂の体積比により屈折率が線形に変化することを確認し、屈折率 1.84 の反射防止コーティングの開発に成功した。シリコン上に塗布した混合エポキシ樹脂は、レンズと同様の方法で切削加工することで膜厚誤差 15  $\mu\text{m}$  を達成した。屈折率と膜厚を精度よく制御した結果、200–250 GHz (帯域約 25%) にかけて約 95%の透過率を得た。また、大口径レンズ (直径 > 150 mm) に適したアルミナ ( $n \sim 3.11$ ) についても検討した。アルミナレンズの表面でも約 26%の反射損失が生じるため反射防止コーティングが必須であるが、アルミナとエポキシ樹脂の熱膨張率が大きく異なるため、エポキシ樹脂のコーティングでは面積の大きいアルミナレンズは破損する可能性がある。そこで、サブ波長構造を利用した反射防止コーティングを開発した。サブ波長構造は単一の物質で反射防止コーティングを形成することができるため、冷却サイクルに強い構造と言える。本論文では四角柱構造を設計し、ダイシングソーを用いることで形状誤差 10  $\mu\text{m}$  以下で加工された。200–250 GHz にかけて 95%以上の透過率を達成し、サブ波長構造による反射防止効果を確認した。

ダブルスロットアンテナを結合した MKID と一体型シリコンレンズアレイを組み合わせたミリ波帯カメラの評価として、220 GHz 帯のビームパターン測定を行った。 $^3\text{He}$  吸着型冷凍器を使用した 300 mK を実現する冷却システムと、マイクロ波信号発生器と周波数通倍器を組み合わせたミリ波発振源を用いたビームパターン測定系を開発した。ビームパターン特性は、レンズとアンテナのアライメントに留意することで実験値と理論値が良く一致することを確認し、設計の妥当性を実証した。

以上の要素技術をもとに、冷却アルミナレンズ (直径 170 mm) と冷却シリコンレンズ (直径 50 mm) を組み合わせて F/6 望遠鏡焦点に結合可能な 220 GHz 帯 608 画素広視野カメラシステムを開発した。カメラ焦点面における F 値は、冷却部をコンパクトにするために F/1 とした。広視野カメラシステムの冷却部には 100 mK で 20  $\mu\text{W}$  の冷却能力をもつ希釈冷凍機を用いている。直径 150 mm の真空窓からの熱流入を減らす赤外遮断フィルターや、迷光を抑えるバッフル形状を工夫することで検出器は 100 mK で動作する。MKID は 608 画素中 95%が動作することを確認し、高い歩留まりが得られた。また、77 K と 300 K の黒体源による光学応答を検出したことからシステムが正常に動作することを実証した。

南極 10 m テラヘルツ望遠鏡は 2 つのナスマス焦点を持ち、それぞれにテラヘルツ波カメラとヘテロダイン受信機を搭載する。望遠鏡ナスマス焦点(F/6)をカメラ焦点(F/1)に結合する伝送光学系に、4 枚の常温ミラー、1 枚の冷却アルミナレンズを用いることで 850 GHz で視野 1 度という広視野光学系の設計解を得た。開発した 220 GHz 帯広視野カメラの要素技術をもとに、大きさ 50 mm の正六角形のモジュールに約 3000 画素、直径 160 mm の焦点面に 7 モジュールを配置し約 20000 画素を実現する 850 GHz 帯テラヘルツ波カメラの設計解を示した。